

삼천포와 서천 화력발전소에서 발생하는 석탄회중의 중금속 함량에 관한 연구*

윤정한** · 오근창** · 김용웅*** · 신방섭**

Content of Heavy Metals in Coal Fly Ash from the Samcheonpo and the Seocheon Power Plant*

Chung-Han Yoon**, Keun-Chang Oh**, Yong-Woong Kim*** and Bang-Sup Shin**

ABSTRACT: Coal fly ashes collected from the Samcheonpo and the Seocheon Power Plants were analyzed for major and minor components and heavy metals such as As, Cd, Co, Cr, Cu, Ga, Hg, Mo, Ni, Pb, Sb, V and Zn in order to suggest basic data to apply coal fly ash as fertilizer or soil ameliorator. The specific gravity of the samples was less than 2.0, and amounts of organic matter range from 5.0% to 12.3%. The identified minerals by XRD were mainly quartz, mullite and pyrite in anthracite coal, and mainly quartz and mullite in bituminous coal. Generally, the contents of heavy metal elements analyzed were lower less than those of soil, though higher in some samples. Element couples of some elements(e.g., As-Mo, Zn ; Mo-As, Sb, V, Zn ; Sb-Zn) show positive correlations with each other, but the high correlations of toxic elements such as As, Pb, Cd and Hg indicate to give attention to apply coal fly ash as fertilizer or soil ameliorator.

서 론

석탄을 연료로 발전하는 국내 화력발전소에서 발생하는 석탄회량은 연간 270만톤 이상에 이르고 있다. 이를 방치하므로서 발생하는 문제는 주변부 오염을 비롯하여 재해발생 등 많은 문제를 안고 있으므로 이들을 다량으로 재활용하는 기술을 개발하는 것이 급선무이다.

외국의 경우 석탄회를 비료 또는 토양개량제로서 활용하는 기술을 활발하게 연구하고 있으며(Mishima 1991; Hermann *et al.*, 1988; Miwa *et al.*, 1990; Hoetler *et al.*, 1987), 국내의 경우 석탄회를 시멘트, 골재, 도로포장, 세라믹 제품 및 인공불석 제조에 관한 연구(최정, 1982; 김지동 등, 1983; 강성규 등, 1984, 엄태영, 1983)가 다수 이루어졌으나 비료 및 토양개량제로서의 연구는 김석구 등(1988)이 연탄재를 이용한 분뇨퇴비화 연구이외는 많지 않은 편이다. 따라서 본 연구에서는 매년 다량으로 발생하는 석탄회를 비료 또는 토양개량제로서 사용할 수 있는 기술개발에 필요한 기초자료를

제공하기 위해서 석탄회의 비중, XRD에 의한 광물동정, 유기물 함량(잔류석탄함량과 동일함. 이하 유기물함량이란 잔류석탄함량을 의미함.), 주성분 및 미량원소함량을 분석하였다. 본 연구를 위해서 국내 무연탄을 주원료로 사용하는 서천화력발전소와 영동화력발전소에서 발생하는 무연탄회와 외국으로부터 수입 유연탄을 연료로 사용하는 삼천포화력발전소에서 발생하는 유연탄회를 각각 30 kg 이상씩 시료로 채취, 실험하였다.

실험 방법

서천, 삼천포 그리고 영동화력발전소에서 발생한 석탄회(fly ash)와 bottom ash를 30 kg 이상씩 채취하여 아직 연소되지 않은 유기물(잔류석탄)을 제거하기 위해서 10g의 시료를 자재도가니에 평취하여 전기로에서 서서히 850°C까지 온도를 상승한 후 30분간 가열하여 석탄분이 나타나지 않을 때까지 반복회화시켰다. 주성분 및 미량성분의 원소를 분석하기 위해서 잔류석탄분이 없는 시료를 100 mesh 이하로 분쇄하였으며 분쇄하는 동안에 오염을 방지하기 위하여 tungsten-carbide disc mill을 사용하였다.

비중은 Mirage사 electronic densimeter를 이용하여 30g의 시료로 측정하였고 각 시료를 3회 반복측정하였으며 오차

*이 연구는 한국과학재단 S3-96 목적기초지원으로 이루어진 연구의 일부임을 밝힙니다.

**전남대학교 자원공학과 (Dept. of Mineral and Energy Engineering, Chonnam Nat. Univ., Kwangju 500-757, Korea)

***전남대학교 농화학과 (Dept. of Agricultural Chemistry, Chonnam Nat. Univ., Kwangju 500-757, Korea)

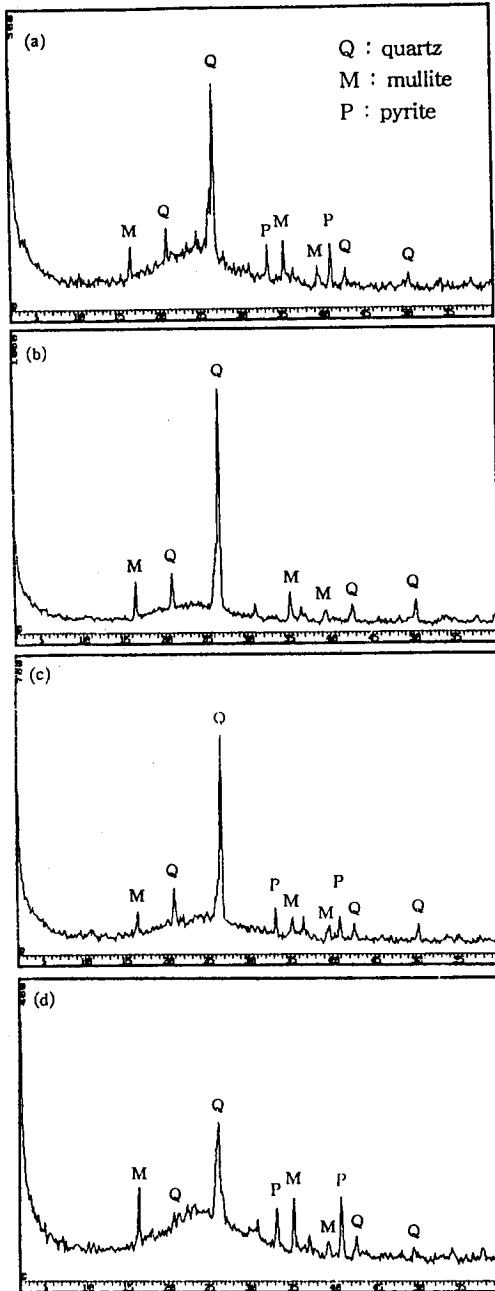


Fig. 1. XRD patterns of the fly ash samples. (a) Seocheon Fly ash, (b) Samcheonpo Fly ash, (c) Seocheon Bottom ash, (d) Youngdong Fly ash.

범위는 ± 0.01 이다. 유기물함량은 850°C 로 가열회화 시킨 후 그 감량을 측정한 값이다. XRD를 이용하여 분말시료중의 광물을 감정하였으며 X-선회절분석 조건은 $\text{Cu-K}\alpha$ 선을 사용하였고 가속전압 및 전류는 $40\text{ Kv}/20\text{ mA}$, scanning speed는 $2^{\circ}/\text{min}$, 2θ 는 $5\sim 60^{\circ}$ 구간을 분석하였다. 주성분 및 미

Table 1. Specific gravity of the fly ash samples.

	S.G.	Remarks
Seocheon Fly ash	1.956	± 0.01
Samcheonpo Fly ash	1.689	± 0.01
Seocheon Bottom ash	1.906	± 0.01
Youngdong Fly ash	1.793	± 0.01

Table 2. Organic matter of the fly ash samples.

Size(mesh)	Wt(%)	Organic matter(%)	Total(%)
more than +100	2.15	50.00	
-100~+140	2.60	45.77	
Seocheon -140~+200 fly ash	10.19	41.18	12.32
-200~+270	8.60	9.43	
-270~+400	4.06	21.08	
less than -400	72.40	5.80	
more than +50	12.00	46.15	
-50~+70	7.86	24.94	
-70~+100	6.87	8.42	
Samcheon -100~+140-po fly ash	3.85	7.79	10.47
-140~+200	11.47	5.31	
-200~+270	5.67	4.08	
-270~+400	5.59	3.17	
less than -400	46.76	2.31	
more than +16	41.40	1.73	
-16~+20	7.64	1.73	
-20~+30	7.22	9.62	
Seocheon -30~+40 bottom ash	5.84	11.18	5.76
-40~+50	8.05	9.93	
-50~+70	7.32	10.43	
-70~+100	9.12	9.04	
less than -100	13.44	8.75	
Youngdong fly ash raw sample		11.58	11.58

량원소함량은 영국 런던대학교 캐나다 ACTLABS에서 inductively coupled argon plasma를 사용하여 23개 시료를 대상으로 총 43개의 원소를 분석하였다.

결과 및 고찰

X-선회절분석결과에 의하면 연구대상 시료중 국내 무연탄회중의 광물은 주로 석영, mullite 및 황철석으로 구성되어 있으나 수입유연탄회중의 광물은 주로 석영과 mullite로 구성되어 있고(Fig. 1(a)~1(d)), 비중은 Table 1에 나타낸 바와 같이 삼천포발전소에서 발생한 유연탄회가 1.69로 가장 낮고 그밖의 시료의 비중은 1.8~1.96으로 2.0 미만이다.

Table 2에서 알 수 있는 바와 같이 fly ash중의 입도별 유기물함량은 2.31%에서 50%까지 다양하나 환산된 전 유기물함량은 10.47%에서 12.32%로 비교적 일정하며 서천발전

Table 3. Contents of major and minor components in fly ash samples (in Wt.%).

	Size(mesh)	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	
Seocheon Fly ash	+100	29.38	5.98	0.83	0.82	0.27	4.18	1.65	0.17	0.06	
	-100/+200	28.40	6.70	0.93	0.85	0.27	4.17	1.58	0.17	0.06	
	-140/+200	27.64	6.44	0.92	0.91	0.26	4.02	1.56	0.16	0.06	
	-200/+270										
	-270/+400	28.44	7.03	0.98	1.08	0.29	4.19	1.55	0.18	0.07	
	-400	30.34	6.24	0.93	0.95	0.32	4.56	1.46	0.23	0.06	
Samcheonpo Fly ash	+50	27.81	1.67	0.30	0.35	0.11	1.1	0.89	0.14	0.02	
	-50/+70	23.56	2.11	0.37	0.32	0.12	0.93	0.75	0.11	0.03	
	-70/+100	18.80	6.34	0.69	0.46	0.13	0.85	0.71	0.11	0.10	
	-100/+140	23.40	8.50	0.68	0.52	0.11	1.08	0.89	0.15	0.14	
	-140/+200	26.15	5.90	0.48	0.53	0.08	1.24	1.08	0.15	0.08	
	-200/+270	28.41	3.22	0.39	0.55	0.07	1.41	1.18	0.16	0.04	
	-270/+400	29.21	3.42	0.41	0.69	0.07	1.52	1.29	0.20	0.04	
	-400	30.57	3.74	0.45	0.90	0.08	1.74	1.31	0.33	0.04	
Seocheon Bottom ash	+16	26.65	6.08	1.03	1.03	0.38	4.41	1.46	0.16	0.06	
	-16/+20	26.15	5.96	0.99	1.03	0.37	4.31	1.42	0.16	0.06	
	-20/+30	26.19	5.93	0.99	1.04	0.38	4.29	1.43	0.17	0.06	
	-30/+40	26.05	6.20	1.01	1.05	0.38	4.30	1.42	0.17	0.06	
	-40/+50	25.58	6.53	1.04	1.08	0.38	4.28	1.39	0.17	0.06	
	-50/+70	24.63	6.97	1.06	1.08	0.35	4.19	1.33	0.17	0.07	
	-70/+100	23.58	7.75	1.08	1.05	0.34	4.06	1.35	0.17	0.07	
	-100	22.95	7.84	1.05	0.95	0.33	3.90	1.28	0.17	0.07	
Youngdong Fly ash		33.85	5.52	0.70	0.58	0.19	4.48	1.62	0.28	0.05	

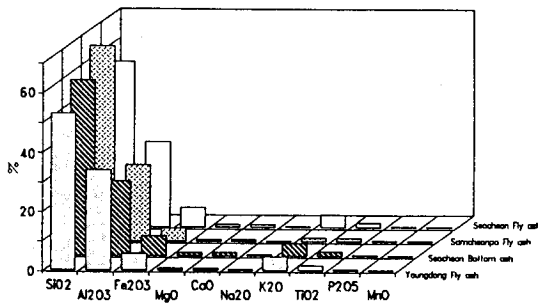


Fig. 2. Abundance of major and minor components in the fly ash samples.

소에 발생하는 bottom ash중의 입도별 유기물함량은 1.73%에서 11.18%로 다양하나 환산된 전유기물함량은 5.76%이다. 본 연구에서 유기물이란 석탄회중에 잔류하는 석탄분을 의미하는 것이므로 Table 2와 같이 높은 유기물함량을 나타내는 것으로 보아 완전연소가 일어나지 않고 불완전연소가 일어났음을 알 수 있다.

주성분 및 부성분함량

채취한 시료를 입도분석하여 입도별로 화학분석을 실시

하였으며 그 결과는 Table 3과 같다. Table 3 및 Fig. 2에서 알 수 있는 바와 같이 석탄회는 주로 SiO₂와 Al₂O₃로 구성되어 있다. 서천 bottom ash를 제외한 국내무연탄회중의 Al₂O₃함량이 수입유연탄회중의 Al₂O₃함량보다 높으며 특히 서천발전소에서 발생하는 fly ash중의 Al₂O₃함량이 가장 높게 나타나고 서천 bottom ash중 Al₂O₃함량은 입자가 작아질수록 낮아지는 경향을 보여준다(Table 3). Al₂O₃함량이 높은 이유는 주로 석탄을 구성하는 광물중에 점토광물이 많이 포함되어 있고 이들이 800~1210°C이상의 고온에서 mullite(Al₆Si₂O₁₅)로 전이(Deer, et al., 1965) 되었기 때문인 것으로 판단된다.

Fe₂O₃는 국내 무연탄회중의 평균함량이 5.52~6.66%로 수입유연탄회중의 평균함량 4.35%보다 약간 높은 경향을 보여주는데 이는 석탄중에 포함된 황철석 및 기타 점토광물의 영향때문인 것으로 보인다. 서천 bottom ash중 Fe₂O₃함량은 입자가 작아질수록 높아지는 경향을 보여 준다(Table 3). K₂O 함량도 국내 무연탄회중의 평균함량이 4.22~4.48%로 수입유연탄회중의 평균함량 1.23%보다 훨씬 높은 경향을 보여주는데 이는 국내 무연탄중에는 백운모, 견운모 및 일라이트 등과 같은 K를 포함하는 광물의 영향(전효택 등, 1987; 안재휴, 1993) 때문인 것으로 보인다. 삼천포 fly ash중 K₂O함량은 입자가 작아질수록 높아지는 경향을 보여주는 반면에 서천 bottom ash중 K₂O함량은 낮아지는 경향을 보여준다(Table

Table 4. Contents of heavy metal elements in the fly ash samples. (in ppm)

Size(mesh)	As	Ba	Cd	Co	Cr	Cu	Ga
Seocheon +100		834		111	124	93	
Fly ash							
-100/+200	26.4	810	0.02	123	118	92	1.51
-140/+200	25.3	786	0.02	31	103	91	1.2
-200/+270	22.7		0.02				1.14
-270/+400	24.3	812	0.02	45	109	106	1.55
-400	47.8	834	0.019	16	124	126	2.35
Samcheon-							
+50	2.46	1251	0.02	147	60	34	1.23
Fly ash							
-50/+70	2.62	856	0.019	148	52	27	0.81
-70/+100	3.05	775	0.02	139	76	28	0.737
-100/+140	4.37	1017	0.02	134	83	34	0.864
-140/+200	3.69	1201	0.02	106	72	35	0.399
-200/+270	4.09	1462	0.02	52	71	42	0.217
-270/+400	6.06	1859	0.019	66	61	51	0.53
-400	14.10	2409	0.02	84	79	77	1.3
Seocheon +16	0.244	953	0.02	57	511	63	0.205
Bottom ash							
-16/+20	0.684	985	0.02	97	134	70	0.795
-20/+30	0.76	973	0.02	116	149	115	1.02
-30/+40	0.876	990	0.019	106	162	265	0.803
-40/+50	1.57	982	0.02	91	173	174	1.22
-50/+70	2.18	972	0.02	113	137	126	0.958
-70/+100	1.95	961	0.02	82	136	164	0.837
-100	4.73	926	0.02	68	118	103	1.06
Youngdong Fly ash	37.3	770	0.02	14	361	126	1.18
Size(mesh)	Hg	Mo	Ni	Pb	Sb	V	Zn
Seocheon +100			71			193	109
Fly ash							
-100/+200	0.028	6.37	68	0.989	0.292	170	113
-140/+200	0.02	4.47	59	1.00	0.198	160	108
-200/+270	0.024	4.96		3.58	0.142		
-270/+400	0.02	4.5	63	1.72	0.23	158	127
-400	0.02	7.67	75	1.15	0.565	183	250
Samcheon-							
+50	0.038	7.28	134	0.854	0.91	116	100
Fly ash							
-50/+70	0.024	2.74	116	0.564	0.565	85	80
-70/+100	0.06	2.02	206	0.446	0.48	81	81
-100/+140	0.058	2.33	296	0.665	0.643	109	135
-140/+200	0.042	3.62	253	0.467	0.502	122	96
-200/+270	0.02	2.12	178	0.568	0.324	135	126
-270/+400	0.019	2.55	208	0.632	0.475	153	190
-400	0.02	8.09	255	0.746	0.858	195	419
Seocheon +16	0.02	0.769	61	0.379	0.049	168	43
Bottom ash							
-16/+20	0.028	1.26	59	0.949	0.182	164	63
-20/+30	0.024	1.35	61	1.00	0.18	162	53
-30/+40	0.021	2.11	65	0.855	0.239	162	53
-40/+50	0.026	1.93	67	17.1	0.218	157	61
-50/+70	0.036	1.86	66	0.942	0.249	151	62
-70/+100	0.04	1.93	68	0.777	0.288	145	71
-100	0.032	2.24	73	338	0.26	143	99
Youngdong Fly ash	0.02	21.9	95	2.23	0.335	222	250

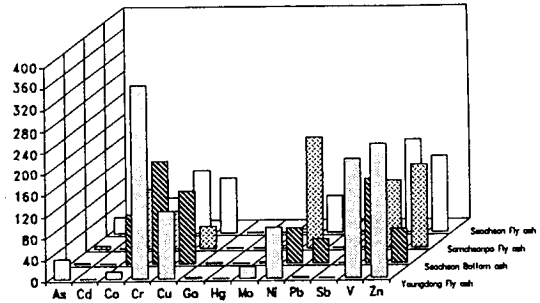


Fig. 3. Abundance of heavy metal elements in the fly ash samples.

는다.

미량원소함량

분석된 33개의 미량원소중 13개의 중금속 또는 환경영향 원소함량에 관하여 살펴보면 Table 4 및 Fig. 3과 같다.

As은 U, Sn, Bi, Mo 및 P, 특히 금광상에서는 Au와 강한 친화력을 갖는 원소로서 지각과 토양중에는 각각 1.8 ppm과 1~50 ppm정도 함유되며 풍화산물로는 Fe산화물과 유기물에 포함된다(Rose *et al.*, 1979). 연구대상 시료중 국내무연탄을 연료로 발전하는 서천발전소와 영동발전소의 fly ash중 As 함량이 22.7~47.8 ppm (평균함량; 29.3 ppm)으로 수입유연탄중 As함량 2.46~14.10 ppm (평균함량; 5.05 ppm)보다 높은 함량을 보여준다(Table 4). 서천발전소에서 발생하는 bottom ash중 As함량은 0.24~4.73 ppm(평균함량; 1.62 ppm)으로 같은 발전소에서 발생하는 fly ash중 As함량보다 훨씬 낮다. 석탄회중 국내 무연탄회의 As함량은 우리나라 일반농경지에서 As함량 0.07~1.24 ppm (평균함량; 0.53 ppm), 일본 토양중 As함량 0.01~40 ppm (평균함량; 6 ppm), 금산의 정원 토양중 As함량보다는 약간 높은 경향을 보여주나 서울, 온산, 태백산지역의 As함량(전효택과 최완주, 1992)과는 유사하며 옥동천의 하상퇴적물중의 As함량(Cheong and Iain, 1994)보다는 낮은 경향을 보인다. 일반적으로 석탄회의 입도가 작아질수록 As함량이 높아지는 경향(Table 4)을 보여주는데 이는 비표면적이 클수록 흡착능이 커지기 때문인 것으로 보인다.

Cd은 일반적으로 Zn에 수반되어 배태하며 비광화환경에서 비교적 이동성이 크며 암석보다는 fresh water에서 비교적 평균함량이 높다. 이 연구를 위해서 채취된 시료중의 Cd함량은 입도에 관계없이 0.02 ppm이하(Table 4)이다. 이는 Rose *et al.*(1979)와 Levinson(1974)이 제시한 지각과 토양중 Cd함량인 0.5~1 ppm이하일 뿐만아니라 전효택과 최완주(1992), 김상현과 전효택(1993a, 1993b), 전효택과 정명채(1991), 김

3). 그밖의 주성분 또는 부성분함량은 국내 무연탄중의 함량(전효택 등, 1987; 안재휴, 1993)과 큰 차이를 나타내지 않

주용과 전효택(1993), Cheong and Iain(1994) 등이 도시의 분진 및 토양중의 Cd함량, 삼보연-아연-중정석 광산주변 토양에서의 Cd함량, 장항제련소지역의 토양과 분진중의 Cd함량, 함우라늄흑색세일중의 Cd함량 그리고 옥동천의 하상퇴적물중의 Cd함량보다 대단히 낮은 함량이며 우리나라 농경지에서 Cd함량 0.08~0.35 ppm(평균함량; 0.13 ppm), 일본 토양중 자연함유량 0.01~0.7 ppm(평균함량; 0.06 ppm)보다도 약간 낮은 함량을 나타낸다. Fly ash중 Cd함량이 이렇게 낮은 이유는 석탄중에 Cd에 의해서 치환될 수 있는 석아연석 등과 같은 광물이 없기 때문인 것으로 사료된다.

Co는 초염기성암이나 염기성암중에 Mg 또는 Ni와 공생하며(Rose *et al.*, 1979) 점토광물에 흡착되거나 황철석중에 미량으로 존재하기도 하며 유기물과 반응하여 복합유기물을 형성하기도 한다(Nicholls, 1968; Bousk, 1981). 연구대상 시료중 Co함량은 수입유연탄회에서 52~148 ppm (평균함량; 109.5 ppm)으로 국내무연탄회중의 Co함량 14~123 ppm (평균함량; 약 57 ppm)보다 더 높은 함량을 나타낸다(Table 4). 이는 국내무연탄회중의 평균Co함량 26 ppm (안재휴, 1993), 함우라늄 흑색세일이 분포하는 덕평리 정원토양중 Co함량 15~17 ppm (전효택과 정명채, 1991), 옥동천 하상퇴적물 중 Co함량 10~23 ppm (Cheong and Iain, 1994)보다 2~3배 높은 함량이다. 삼천포화력의 fly ash중 Co함량은 As함량과는 달리 일정치는 않지만 입도가 낮아질수록 높아지는 경향을 나타낸다(Table 4).

Cr은 초염기성암석에서 Ni과 Mg와 친화력이 크고 토양 중에는 Fe산화물에 존재하며 지각 또는 토양중에 Cr함량은 100 ppm과 5~1000 ppm 정도 함유된다(Rose *et al.*, 1979, Levinson, 1974). 연구대상 시료중 국내무연탄회중 Cr함량이 103~511 ppm으로 수입유연탄중 Cr함량 52~83 ppm (평균함량; 69.25 ppm)보다 훨씬 높은 경향을 보여준다. 서천발전소에서 발생한 무연탄회중 fly ash중의 Cr함량보다 bottom ash중의 함량이 더 높으며 bottom ash중 Cr함량은 입도가 낮아질수록 함량도 낮아지는 경향을 나타낸다(Table 4). Nicholls(1968)에 의하면 Cr은 석탄층이 형성될때 또는 형성된 이후에 주로 점토광물에 흡착되어 석탄층중에 함유된다고 밝힌 바 있다. 따라서 수입유연탄중의 Cr함량보다 국내 무연탄중의 Cr함량이 높고 수입유연탄중의 Cr함량이 입도에 따른 변화가 거의 없는 것으로 보아 국내 무연탄중의 Cr은 주로 Fe산화물을 주로 하는 육원성점토질중에 함유되었고 수입유연탄중의 Cr은 주로 유기질 함량이 많은 환경에서 생성되었기 때문인 것으로 보인다. 국내석탄회분중 Cr함량 222 ppm (안재휴, 1993)과는 유사하나 옥동천의 하상퇴적물중 Cr함량 22~26 ppm (Cheong and Iain, 1994), 함우라늄흑색세일이 분포하는 지역의 정원토양중 Cr함량 38~45 ppm

(전효택과 정명채, 1991)보다 3~5배 높은 함량을 나타낸다.

Cu는 황화물광상에서 Pb, Zn, Mo, Ag, Au, Sb, Se, Ni, Pt 및 As와 친화력이 높은 원소이며 토양중에는 Mn산화물, 유기물 및 탄산염광물중에 함유되어 있으며 지각과 토양중의 Cu함량은 55 ppm과 2~100 ppm 정도 함유되어 있다(Rose *et al.*, 1979, Levinson, 1974). 연구대상 시료중 Cu함량은 수입유연탄회중함량 27~77 ppm (평균함량; 41 ppm)보다 국내무연탄회중함량이 91~265 ppm (평균함량; 131 ppm)으로 약 3배정도 더 높은 분석치를 나타낸다. 서천발전소의 fly ash와 삼천포발전소의 fly ash중 Cu함량은 입자가 커짐에 따라서 Cu함량도 대체로 높아지는 경향을 보여준다(Table 4). 국내 무연탄중의 Cu함량이 수입유연탄중 Cu함량보다 높은 이유는 확실치는 않으나 국내 무연탄중의 황철석의 영향때문인 것으로 사료된다. 국내 무연탄회중 Cu평균함량 95 ppm (안재휴, 1993)은 서울지역 토양중 Cu함량 11~471 ppm (김주용과 전효택, 1993)과는 유사하고 전효택과 최완주(1992)가 연구한 금산, 서울, 태백산지역의 정원토양중 Cu함량 36.7~43.9 ppm (평균함량; 39.63 ppm)보다는 높지만 온산지역 정원토양중 Cu함량 65.0~4406 ppm (평균함량; 1032.27 ppm)보다는 낮은 함량이다. 본 연구대상 시료중 Cu함량은 우리나라 일반농경지(국립환경연구원, 1986)에서 Cu함량 2.22 ppm~6.81 ppm (평균함량; 4.19 ppm)보다 훨씬 높다.

Ga는 지각중에 N, Nb, Li 및 Pb와 유사한 함량으로 존재하며 Zn 및 Ge에 수반되기도 하고 bauxite의 Al에 수반되어 산출되지만 희유광물인 germanite에서 가장 높게 농집되어 있다(Greenwood and Earnshaw, 1984). 지각과 토양중의 Ga평균함량은 15 ppm (Levinson, 1974)인데 수입유연탄의 회분중 Ga함량은 0.4~1.3 ppm (평균함량; 0.8 ppm)이고 국내무연탄의 회분중 Ga함량은 서천 fly ash가 1.14~2.35 ppm (평균함량; 1.55 ppm), 서천 bottom ash가 0.2~1.22 ppm (평균함량; 0.86 ppm), 영동 fly ash가 1.18 ppm으로 국내무연탄 회분중의 Ga함량이 수입유연탄중의 함량에 비해서 약간 높으나 지각 및 토양중의 평균함량보다는 훨씬 낮은 함량을 나타낸다. 연구대상 시료중 Ga함량이 낮은 이유는 석탄중에 석아연석 또는 germanite와 같은 광물이 포함되어 있지 않기 때문으로 보인다.

Hg는 황화물광상에서 Ag, Pb, Sb, Se 및 Zn 등의 원소와 공생하는데(Rose *et al.*, 1979) 토양중에는 0.03 ppm 정도 존재한다(Levinson, 1974). 연구대상 시료중 국내무연탄회중 Hg함량은 0.02~0.04 ppm (평균함량; 약 0.02 ppm)으로 수입유연탄회중 Hg함량 0.01~0.06 ppm(평균함량; 0.03 ppm)보다 약간 낮은 경향을 보여주며(Table 4)각 시료의 입자별 Hg함량차이도 거의 보여주지 않는다. 이상의 분석치는 전효택과 최완주(1992)가 금산, 온산, 서울, 태백산지역의 정원과 화단의

토양을 대상으로 분석한 Hg분석치(평균함량; 0.14~2.62 ppm)보다 훨씬 낮고 일반농경지(국립환경연구원, 1986)중의 Hg함량(0.03~0.17 ppm)보다도 낮은 함량이다.

Mo는 합동반암광상 또는 휘수연광상 및 스카른광상에서 Cu, Pb, Zn, Re, W, Sn 등과 같은 원소와 공생하는 원소로서 지각중에는 1.5 ppm 토양중에는 2 ppm 포함되어 있다(Rose *et al.*, 1979; Levinson, 1974). 연구대상 시료중 수입유연탄회의 Mo함량은 2.02~8.09 ppm(평균함량; 3.84 ppm)으로 국내무연탄회중 Mo함량보다 대체로 낮은 경향을 보여준다(Table 4). 서천 bottom ash중의 무연탄회중의 함량 0.76~2.24 ppm(평균함량; 1.68 ppm)보다는 높은 값을 보여준다(Table 4). 국내무연탄회중의 Mo함량이 수입유연탄중의 Mo함량보다 높은 이유는 석탄층 형성시에 포함되어었거나 형성후에 2차적으로 생성된 Fe산화물 형성에 기인된 것으로 보인다. 이상의 분석치는 전효택과 최완주(1992)가 금산, 온산, 서울, 태백산지역에서 정원과 화단토양을 대상으로 분석한 분석치보다 대체로 높은 경향을 나타낸다.

Ni는 초염기성암과 염기성암에서 Mg 및 Co와 함께 배태되거나 황화광물에서 Co, Cu 및 Pt과 함께 산출되며 풍화산물로서 Ni는 Fe산화물 또는 규산염광물중에 포획되어 산출된다. 지각과 토양중 Ni함량은 각각 75 ppm과 5~500 ppm 정도 포함된다(Rose *et al.*, 1979; Levinson, 1974). 연구대상 시료중 수입유연탄회중의 Ni함량이 116~296 ppm(평균함량; 205.75 ppm)으로 국내무연탄으로 발전하는 서천발전소의 fly ash, bottom ash 및 영동발전소의 fly ash중의 Ni함량 59~75 ppm(평균함량; 67.2 ppm), 59~73 ppm(평균함량; 65 ppm), 95 ppm보다 훨씬 높은 경향을 나타낸다. 본 연구대상 시료중 국내무연탄회중의 Ni함량은 안재휴(1993)에 의해서 제시된 국내석탄회분중 Ni함량 65 ppm과 대체로 유사한 분석치를 보여준다.

Pb는 귀금속광상, 황화물광상 그리고 조암광물에서 Ag, Fe, Zn, Cu, Sb 및 F와 공생하며 지각과 토양중에는 각각 12.5 ppm과 2~200 ppm정도 포함되어 있으며(Rose *et al.*, 1979; Levinson, 1974) 토양중에는 Mn 산화물 및 Fe산화물 또는 pyromorphite중에 배태된다(Rose *et al.*, 1979). 연구대상 시료중 Pb함량은 서천 bottom ash중에서 비정상적으로 높은 경우를 제외하면 대체로 서천 fly ash중에서 높은 반면 삼천포 fly ash에서는 낮은 경향을 보여 준다. 연구대상 시료중 Pb함량(Table 4)은 금산, 서울, 온산 및 태백산지역의 정원토양을 대상으로 분석한 Pb함량(전효택과 최완주, 1992), 삼보광산 지역의 논, 밭토양중 Pb함량(김상현과 전효택, 1993), 서울 지역토양중 Pb함량(김주용과 전효택, 1993)에 비해서 훨씬 낮은 분석치를 나타낸다. 국내 일반농경지의 Pb함량(국립환경연구원, 1986) 4.01~18.39 ppm(평균함량; 6.93 ppm)보다 약

간 낮은 함량을 보여준다.

Sb는 귀금속광상과 base-metal광상에서 Au, Ag, Hg, As 및 Pb, Zn과 공생하며 지각과 토양중에는 각각 0.2 ppm과 5 ppm(Rose *et al.*, 1979, Levinson, 1974) 포함되어 있다. 연구대상 시료중 Sb함량은 수입유연탄회중 함량이 0.32~0.91 ppm(평균함량; 0.59 ppm)으로 국내무연탄회중 함량 0.04~0.56 ppm(평균함량; 0.30 ppm)보다 약간 높은 경향을 보여준다. 연구대상 시료중 Sb함량은 금산, 온산, 서울 및 태백산 지역의 정원토양의 Sb함량(전효택과 최완주, 1992)과 옥동천 하상퇴적물중의 Sb함량(Chong and Iain, 1994)보다 훨씬 낮은 경향을 나타낸다.

V는 secondary우라늄 광물에서 U 또는 유기물과 함께 배태하며 토양중에서는 Fe산화물 또는 유기물과 함께 존재한다. 지각과 토양중 V함량은 각각 135ppm과 20~500 ppm 정도이다(Rose *et al.*, 1979, Levinson, 1974). 연구대상 시료중 V함량은 수입유연탄회중 함량 81~195 ppm(평균함량; 124 ppm)보다 국내무연탄회중 함량이 143~222 ppm(평균함량; 183.6 ppm)으로 약간 높은 경향을 보여준다. 이상의 분석치는 옥동천의 하상퇴적물중의 V함량(Cheong and Iain, 1994)보다 훨씬 높으나 함우라늄흑색세일 분포지역에서의 V함량(전효택과 정명채, 1991)보다는 약간 높은 경향을 나타낸다. 삼천포 수입유연탄회중 V함량은 입도가 낮아질수록 낮아지는 반면 서천화력의 국내무연탄회중 V함량은 입도가 낮아질수록 높은 경향을 보여준다(Table 4).

Zn은 base metal광상과 귀금속광상에서 Cu, Pb, Ag, Au, Sb, As 및 Se와 공생하며 토양에서는 Fe와 Mn산화물 또는 유기물중에 존재하며 지각과 토양중의 Zn함량은 각각 70 ppm과 10~300 ppm정도 포함되어 있다(Rose *et al.*, 1979, Levinson, 1974). 연구대상 시료중의 Zn함량은 수입유연탄회중 함량이 80~419 ppm(평균함량; 153.37 ppm)으로 국내무연탄회중 함량 43~250 ppm(평균함량; 151.2 ppm)보다 약간 높은 함량을 나타낸다. 이는 서울지역 토양중 Zn함량(김주용과 전효택, 1993), 삼보광산주변 하상퇴적물중 Zn함량(김상현과 전효택, 1993), 도시 및 산업환경 정원토양중 Zn함량(전효택과 최완주, 1993)보다 훨씬 낮으나 일반농경지(국립환경연구원, 1986)중 Zn함량 2.84~14.81 ppm(평균함량; 5.74 ppm)보다는 훨씬 높은 함량이다. 국내무연탄 bottom ash와 수입유연탄 fly ash중 Zn함량은 뚜렷하지는 않지만 입도가 작을수록 대체로 높아지는 경향을 나타낸다(Table 4).

원소상호관계

분석된 원소중 본 연구에서 연구대상으로 사용한 원소들의 상관관계에서 비교적 좋은 상관관계를 나타내는 원소들간의 scatter diagram을 Fig. 4에 나타냈다. Fig. 4에서 볼 수 있는

이들은 성인적으로 상이한 환경에서 생성되었음을 시사해 주고 있다.

사 사

본 연구는 한국과학재단의 93년 목적기초연구 93-0800-10-01-3의 일환으로 수행되었으며 연구비를 지원해 준 한국과학재단에 감사한다. X-선 회절분석을 도와주신 조선대학교 자원공학과 박 천영 교수와 원고를 타이핑 해 준 전남대학교 공과대학 박 영주양에게 감사하며, 특히 이 원고를 자세히 읽으시고 많은 조언을 해 주신 전북대학교 공과대학 김 옥배 교수님께 심심한 사의를 표한다.

참고문헌

- 강성규, 김영일, 김지동(1984) 석탄회의 지역별 활용방안. *Energy R & D*, 6(4), p.105-118.
- 김상현, 전효택(1993, a) 삼보 연-아연-중적석광산 주변 토양에서의 중금속 오염 연구. *한국자원공학회지*, 30권, p.228-237.
- 김상현, 전효택(1993, b) 삼보 연-아연-중적석광산 주변 하상퇴적물에서의 중금속 오염 연구. *대한광산지질학회지*, 26권, p.217-226.
- 김주용, 전효택(1993) 서울지역 토양과 분진층의 Cu, Pb, Zn, Cd의 지구화학적 분산. *한국자원공학회지*, 30권, p.163-176.
- 김지동의 5인(1983) 석탄회의 활용방안연구. KE-83-9, 한국동력자원연구소.
- 안재휴(1993) 우리나라 무연탄의 특성이 활용에 미치는 영향. 전남대학교 대학원 박사학위논문, 186p.
- 임태영(1983) 국산 Fly ash의 특성 및 단열재료의 이용에 관한 연구. 한양대학교 대학원 석사학위논문.
- 전효택, 서정희, 손현준, 김명균(1987) 석탄 및 석탄회의 특성 규명 및 활용방안 연구(제1차년도). 대한석탄공사 기술연구소 · 서울대학교 공과대학 부속 생산기술연구소, 98p.
- 전효택, 정명채(1991) 함우라늄 흑색세일 분포지역에서의 유독성 원소들의 분산에 관한 지구 화학적 연구. *대한광산지질학회지*, 24권, p.245-260.
- 전효택, 최완주(1992). 도시 및 산업환경 분진 및 토양중의 중금속 원소들의 분산에 관한 지구 화학적 연구. *대한광산지질학회지*, 25권, p.317-336.
- 최정(1982) 토양개량제인 Zeolite의 흡착에 관한 연구. *한국농화학회지*, 25권, p.99-104.
- Bouska V. (1981) *Geochemistry of coal, coal science and technology*. Elsevier Scientific Publishing Company, Vol.1, 284p.
- Deer, W.A., Howie, R.A., and Zussman, J.(1980) *An introduction to the rock forming minerals*. 12th(ed) Longman, London, p.39, p.258.
- Green-wood, N. N. and Earnshaw, A. (1984) *Chemistry of the elements*. Pergmm press, p.245.
- Nicholls, G.D. (1968) *The geochemistry of coal-bearing strata in coal and coal-bearing strata*. ed., Murchison, D., and Westoll. T.S., Oliver and Boyd, p.309-321.
- Herman, Janusz, Wisniewski and Wojciech (1988) Mobile alumium in sour soils fertilized with power plant fly ashes. *Environ. Prot. Eng.*, v.14, p.85-90.
- Hoelter, Heinz와 5인 (1988) Manufacture of fertilizer from manure and ash. *DE ADDI*. 3.
- Mishima A. (1991) Coal ash Utilization. *Anzen Kogaku*, v.30, p.18-32.
- Miwa, T., Yasuda, M., Niumura, T., Iizawa, M. and Shimada, Y. (1990) Coal ash Utilization, Sekitan Gijutsu Kenkyu Happyokai, Seisan. *Riyo Godo*, v.12, p.134-142.
- Cheong, Y. W. and Iain Thornton (1994) Acid mine drainage and heavy metal contamination of stream sediments in the Okdongcheon stream, Sangdong area, South Korea. *Econ. Environ. Geol.*, v.27, p.101-113.
- Rose, A. W., Hawkes, H. E. and Webb, J. S. (1979) *Geochemistry in mineral exploration*. Academic Press. p.549-581.
- Levinson, A. A. (1974) *Introduction to Exploration Geochemistry*. Applied Publishing Ltd., Calgary. p.43-44.

1995년 1월 23일 원고접수